

Современные геологические процессы

ЮЖНО-ОЗЕРНОВСКОЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ 29.03.2017 г. С $M_w = 6.6$, $K_s = 15.0$, $I = 6$ (КАМЧАТКА)

29.03.2017 г. в 04:09 по Гринвичу (16:09 по местному времени) в западной части Берингова моря произошло сильное землетрясение с магнитудой $M_w = 6.6$ (рис. 1, 2, табл. 1). Согласно принятой регионализации камчатских землетрясений (Левина и др., 2013) оно относится к зоне сейсмичности «Корякский сейсмический

пояс». Гипоцентр землетрясения находился примерно в 90 км к северо-востоку от пос. Усть-Камчатск на глубине ~ 43 км. Эпицентральная область, очерченная афтершоками, располагалась в южной части залива Озерного, исходя из чего это сейсмическое событие названо Южно-Озерновским землетрясением (ЮОЗ).

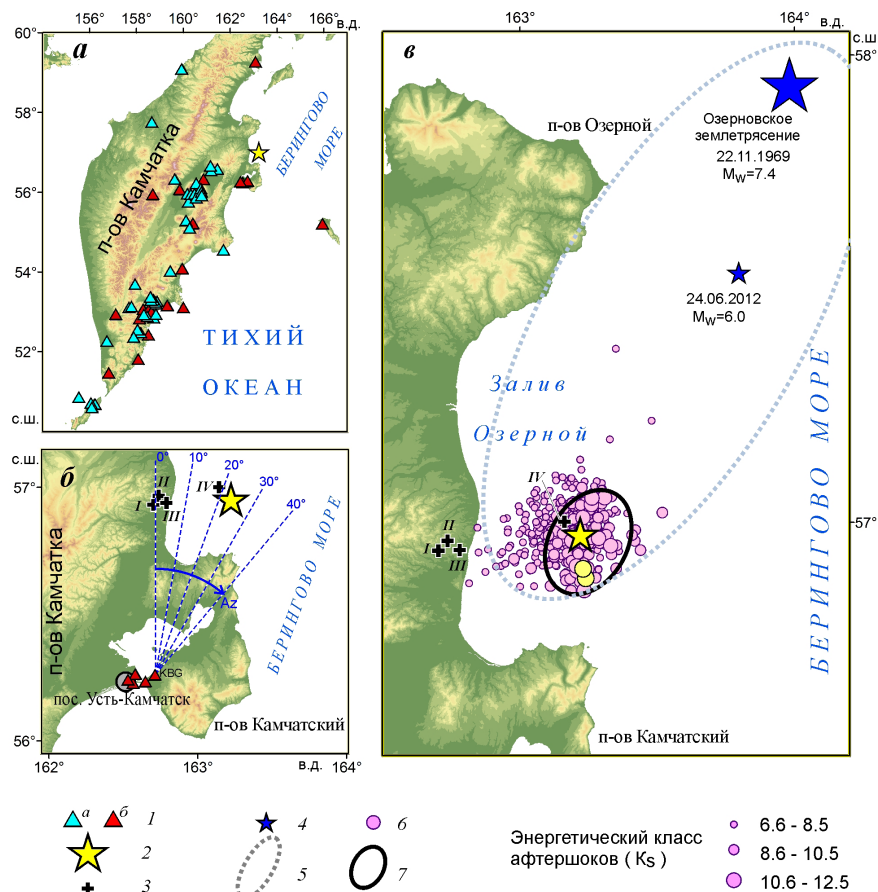


Рис. 1. Южно-Озерновское землетрясение 29.03.2017 г. $M_w = 6.6$ (ЮОЗ) и его афтершоки. Эпицентр землетрясения на схеме Камчатской региональной сети сейсмических станций (а); ближайшая к эпицентру микрогруппа акселерометров, установленных в районе пос. Усть-Камчатск (б); схема расположения эпицентров ЮОЗ и его афтершоков с энергетическими классами $K_s \geq 6.6$ (в): 1 — сейсмические станции (а), в том числе использовавшиеся при анализе пиковых ускорений (б); 2 — эпицентр по данным КФ ФИЦ ЕГС РАН; 3 — эпицентр по данным мировых обрабатывающих центров (табл. 1); 4 — эпицентры сильных ($M_w \geq 6.0$) землетрясений 1961–2017 гг.; 5 — очаговая область Озерновского землетрясения 1969 г. (эллипс, включающий 90% афтершоков двух первых суток с $K_s \geq 10.0$); 6 — эпицентры афтершоков ЮОЗ, светлым цветом выделены два сильнейших афтершока (табл. 1); 7 — эллипс, включающий 90% афтершоков ЮОЗ с $K_s \geq 10.0$. На рис. 1б пунктиром нанесена шкала азимутов (табл. 2).

По данным Камчатского филиала (КФ) Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (ФИЦ ЕГС РАН) ЮОЗ ощущалось в Камчатском крае с интенсивностью до 6 баллов (здесь и далее используется шкала сейсмической интенсивности MSK-64 (Медведев и др., 1965)).

Данное сообщение продолжает серию оперативных публикаций КФ ФИЦ ЕГС РАН о наиболее сильных сейсмических событиях Камчатского региона (Чебров и др., 2013а, 2013б, 2016). Информационной основой этих работ являются данные расположенных на Дальнем Востоке России и на территориях сопредельных государств 138 сейсмических станций, цифровые записи которых доступны в региональном информационно-обрабатывающем центре (РИОЦ) «Петропавловск» в режиме реального времени. 80 из них входят в Камчатскую сеть сейсмического мониторинга. Камчатские станции являются ближайшими к эпицентрам ЮОЗ и его афтершоков и обеспечивают наиболее надежную информацию для расчетов параметров этих событий. В статье использован Камчатский региональный каталог землетрясений¹ и данные мировых информационных центров (NEIC, GCMT, EMSC, ФИЦ ЕГС РАН)².

¹ Региональный каталог Камчатки и Командорских островов <http://www.emsd.ru/sdis/earthquake/catalogue/catalogue.php>

² NEIC: National Earthquake Information Center, U.S. Geological Survey (<https://earthquake.usgs.gov>); GCMT: The Global CMT Project (www.globalcmt.org); EMSC: The European-Mediterranean Seismological Centre (www.emsc-csem.org); ФИЦ ЕГС РАН, г. Обнинск (www.gsras.ru)

ОБРАБОТКА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ ПО РЕГЛАМЕНТАМ СЛУЖБЫ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ О ЦУНАМИ (СПЦ) И СЛУЖБЫ СРОЧНЫХ ДОНЕСЕНИЙ (ССД)

29.03.2017 г. дежурная смена РИОЦ приступила к обработке землетрясения после срабатывания сигнализации при превышении регистрируемым сейсмическим сигналом заданного уровня на станции «Крутоберегово» (KBG), ближайшей к эпицентру. Через 1 минуту сигнал «Регистрируется сильное землетрясение!» был передан в Камчатский центр цунами Росгидромета. Через 3 минуты была получена первая предварительная оценка координат и магнитуды землетрясения, через 4 мин. 40 с — уточненные параметры сейсмического события (широта 57.0° с.ш., долгота 163.2° в.д., глубина $h = 54$ км, $M_s(\text{PET}) = 7.2$ с учетом станционной поправки). Поскольку эпицентр события оказался в открытом море (в заливе Озерном), а магнитуда превысила пороговое значение, была объявлена тревога цунами и проведено оповещение ГУ МЧС России по Камчатскому краю, ССД ФИЦ ЕГС РАН, ФГБУ «Камчатское УГМС» и др. Таким образом, обработка ЮОЗ, подача тревоги цунами и оповещение государственных служб были выполнены в течение 6–7 минут, что полностью соответствует требованиям регламента.

Через 10 минут после начала землетрясения была проведена оценка интенсивности колебаний в ближайших населенных пунктах по инструментальным данным (по записям акселерометров), которые поступают на РИОЦ «Петропавловск» в режиме, близком к реальному времени (Дроздин и др., 2017). Полученная информация была передана в МЧС Камчатского края.

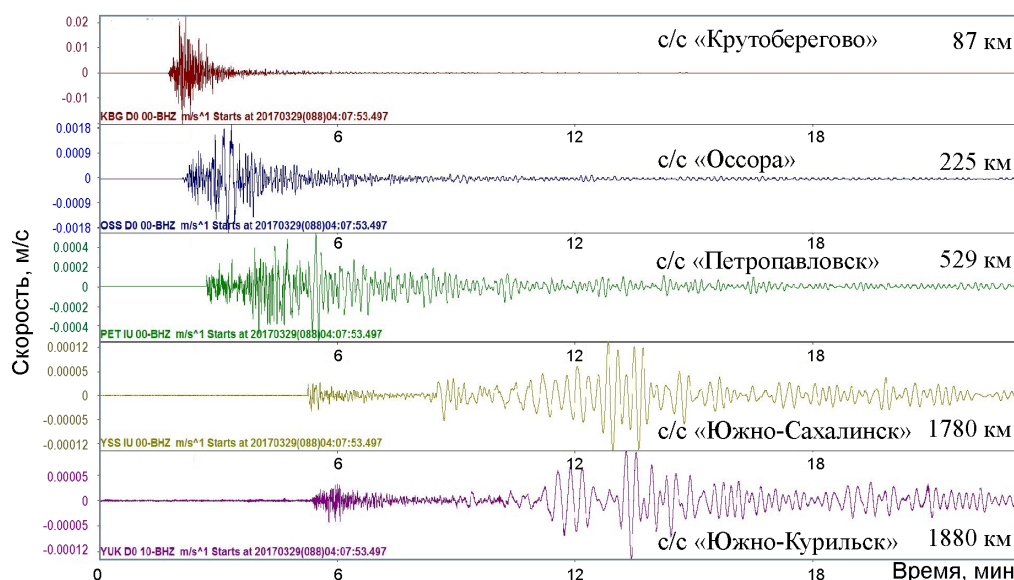


Рис. 2. Примеры записей Южно-Озерновского землетрясения 29.03.2017 г. $M_w = 6.6$ широкополосными сейсмическими станциями.

Таблица 1. Параметры Южно-Озерновского землетрясения 29.03.2017 г. и сильных ($M_w \geq 6.0$) землетрясений рассматриваемого района.

Время в очаге *		Координаты гипоцентра *	Энергетический класс / Магнитуда			
Дата г.м.д.	Время час.:мин.:с	$\varphi, ^\circ$ с.ш. $\lambda, ^\circ$ в.д. $h, \text{ км}$	КФ ФИЦ ЕГС РАН	GCMT	NEIC	ФИЦ ЕГС РАН
Южно-Озерновское землетрясение						
2017.03.29	04:09:22.2	56.97 163.22 43	K_s 15.0 M_L 6.8 M_C 7.2 M_W 6.5	M_w 6.6 M_s 6.6	M_w 6.6 m_b 6.5	m_b 6.6 M_s 6.8
Сильнейшие афтершоки Южно-Озерновского землетрясения						
Афтершок № 1		56.88 163.24 42	K_s 12.5 M_L 5.5 M_C 6.2 M_W 5.0		m_b 5.2	m_b 5.3
2017.03.29	05:27:45.7					
Афтершок № 2		56.9 163.23 46	K_s 12.4 M_L 5.5 M_c 6.3 M_W 4.9	M_w 5.1 M_s 5.2	m_b 5.1	m_b 5.1
2017.03.30	21:24:51.0					
Сильные землетрясения района с $K_s > 13.0$, 1962-2017 гг.						
Озерновское землетрясение		57.93 164.00 40	K_s 15.3 M_L 6.9		M_w 7.4	
1969.11.22	23:09:31.5					
2012.06.24	03:14:59.2	57.53 163.79 40	K_s 13.9 M_L 6.2 M_C 6.8	M_w 6.0 M_s 6.1 m_b 5.8	M_w 6.0 m_b 5.8 M_c 5.8	m_b 6.1 M_s 6.2

Примечание. * по региональному каталогу КФ ФИЦ ЕГС РАН. Энергетические характеристики: K_s — энергетический класс по S-волне по энергетической классификации (Федотов, 1972); M_L — локальная магнитуда; M_c — магнитуда по коде; M_w — моментная магнитуда; M_s — магнитуда по поверхностной волне Релея; m_b — магнитуда по объемным волнам.

УТОЧНЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ОЧАГОВОЙ ЗОНЫ ПО СЕЙСМИЧЕСКИМ ЗАПИСЯМ

Окончательная обработка землетрясения и определение его параметров были произведены по данным 60-ти сейсмических станций, находящихся на Дальнем Востоке России и территориях сопредельных государств. Итоговые параметры землетрясения (табл. 1) близки к первоначальному определению гипоцентра. Точность локации составила 16 км в плане и 20 км по глубине. После основного толчка регистрировалась афтершоковая активность. По данным РИОЦ «Петропавловск» сильное землетрясение и его афтершоки произошли под акваторией Озерного залива (рис. 1). Однако другие информационно-обрабатывающие центры локализовали гипоцентр ЮОЗ под сушей п-ва Камчатка (рис.1, табл. 1). В связи с этим для уточнения положения ЮОЗ и двух его сильнейших афтершоков нами были привлечены независимые методы анализа цифровых сейсмических записей: поляризационный анализ первых вступлений продольных волн и локация источников сейсмических волн сфа-

зированной сейсмической антенной, в качестве которой выступала компактная сейсмическая группа из 5 станций, ближайших к очаговой зоне (эпицентральное расстояние ~80–100 км (рис. 1б)). Для расчетов кросскорреляционных функций использовались начальные пакеты продольных волн в диапазоне частот 0.05–0.5 Гц длительностью ~10 с. В результате тремя способами были получены значения азимута направления на эпицентр для основного события и двух его сильнейших афтершоков, 29.03.2017 г. в 03:05 (далее — афтершок № 1) и 30.03.2017 г. в 21:24 (далее — афтершок № 2) (табл. 2). Анализ этих данных позволяет утверждать, что положение очага землетрясения соответствует Озерному заливу, то есть реально эпицентр находится восточнее, чем показали расчеты других мировых центров, использовавших преимущественно удаленные от Камчатки станции. Координаты землетрясений, полученные в РИОЦ «Петропавловск», находятся в согласии со значениями азимутов, рассчитанных независимыми методами, что позволяет рассматривать их в качестве наиболее достоверных.

Таблица 2. Азимуты на эпицентр и азимуты поляризаций P -волн Южно-Озерновского землетрясения и его сильнейших афтершоков по сейсмическим записям со станции «Крутоберегово» (КВГ, рис. 1б).

Время в очаге: г. мес. д. ч : мин : с	Азимут на эпицентр по каталогам		Азимут поляризации по продольным волнам P		Азимут по группе станций*
	NEIC	КФ ФИЦ ЕГС РАН	Первое вступление P -волны	Группа P волн	
Южно-Озерновское землетрясение					
2017.03.29 04 : 09 : 22.23	3	21	35	25	23
Сильнейшие афтершоки Южно-Озерновского землетрясения					
Афтершок № 1 2017.03.29 05 : 27 : 45.65	5	25	32	24	24
Афтершок № 2 2017.03.30 21 : 24 : 50.99	0.4	24	25	13	29

* Использованы данные микрогруппы акселерометров (рис. 1б), установленных в районе пос. Усть-Камчатск (начальный фрагмент записи P -волн длительностью ~10 с).

АФТЕРШОКОВЫЙ ПРОЦЕСС

С 29.03.2017 г. по 17.07.2017 г. в очаговой области ЮОЗ зарегистрированы 440 афтершоков с энергетическим классом в диапазоне $K_s = 5.8 - 12.5$. Более 40% афтершоков произошло в первые сутки после основного толчка: 184 события, в том числе два сильнейших афтершока с магнитудой $M_L \sim 5.5$. Преобладающее число гипоцентров определено в интервале глубин 3–45 км. Ошибка локации для землетрясений афтершокового облака составила $\sim 11 \pm 4$ км в плане и $\sim 12 \pm 5$ км по глубине (погрешность соответствует средне-квадратичному отклонению).

Уровень надежной регистрации камчатской региональной сети сейсмических станций для афтершоковой последовательности ЮОЗ составляет $K_{\min} = 6.6$ (рис. 3а). С учетом этого при последующем анализе были использованы 380 сейсмических событий с $K_s \geq 6.6$ из очаговой области. Наклон графика повторяемости составляет $\gamma = 0.33 \pm 0.02$ (что соответствует $b = 0.65 \pm 0.03$ для магнитудной шкалы). Эта величина в ~1.5 раза меньше среднего для Камчатки показателя, средне-многолетнее значение которого оценивается как $\gamma = 0.500 \pm 0.003$ (Салтыков и др., 2013). На графике повторяемости (рис. 3а) наблюдается разрыв между главным событием и сильнейшим афтершоком в распределении землетрясений по энергии $\Delta K_s = 2.5$ (соответственно, по магнитуде $\Delta M = 1.3$), что характерно для афтершоковых последовательностей и соответствует закону Бота (Bath, 1965).

Кумулятивный график числа афтершоков (рис. 3б) дает представление о характере развития афтершокового процесса. Скорость потока афтершоков убывает по гиперболическому

закону $\frac{dN}{dt} = \frac{A}{t}$, что соответствует прямоли-

нейному участку графика при логарифмической оси времени. Но в течение первых 2–3 часов после сильного землетрясения эта зависимость не выполняется. Наиболее вероятной причиной изменения параметров сейсмического потока, по нашему мнению, является маскировка слабых землетрясений в условиях большой плотности событий и их потеря при обработке, что подтверждается пониженной представительностью каталога на этом начальном участке: $K_{\min} = 7.9$.

Размеры очага ЮОЗ формально оценены по размерам эллипса рассеяния афтершоков с $K_s \geq 10.0$ (рис. 1в): длина 25 км, ширина 17 км. Азимут большой оси эллипса ($Azm = 22^\circ$) близок к простираению возможных плоскостей разрыва (табл. 3). Отметим, что практически все события, последовавшие за ЮОЗ, происходили в пределах южной части облака афтершоков более сильного Озерновского землетрясения 1969 г. (рис. 1в).

ПАРАМЕТРЫ ОЧАГА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

Механизм очага ЮОЗ и двух его сильнейших афтершоков был определен двумя способами: на основе инверсии волновых форм широкополосных сейсмических записей и по знакам первых вступлений объемных волн P (табл. 3, 4). Механизм, рассчитанный по знакам P -волн, несет информацию только о начальной стадии разрыва в очаге, в то время как механизм, определенный по длиннопериодным волновым формам, относится к очагу в целом и более полно отражает исследуемый процесс. Механизм афтершока № 1 в мировых центрах данных отсутствует.

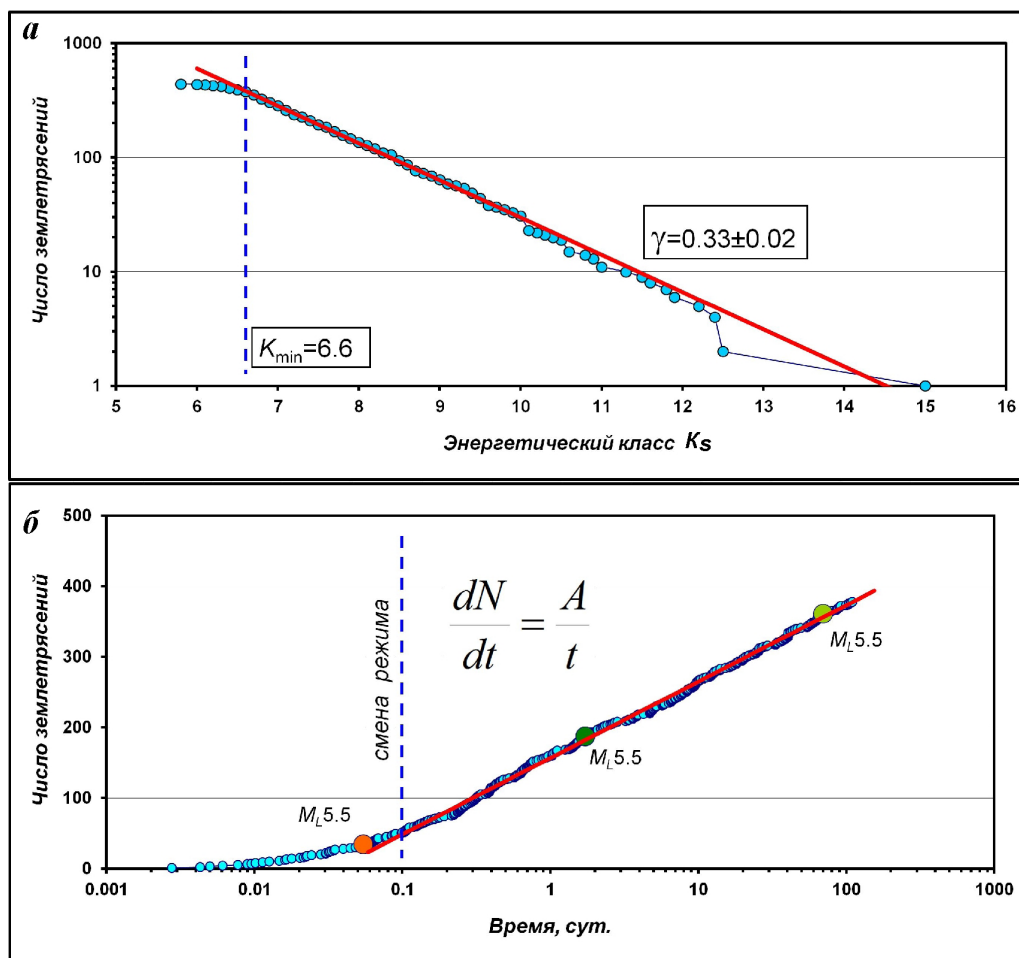


Рис. 3. График повторяемости землетрясений для афтершоковой последовательности (а) и развитие афтершокового процесса во времени (кумулятивный график числа афтершоков) (б). Отмечены наиболее сильные афтершоки. За начало отсчета взято время в очаге Южно-Озерновского землетрясения.

В первом случае для определения механизмов очага применялась методика, изложенная в работах (Абубакиров и др., 2015; Павлов, Абубакиров, 2012). В качестве исходных данных использованы волновые формы с широкополосных станций в диапазоне эпицентральных расстояний от 50 км до 2000 км. Определены глубина h эквивалентного точечного источника, длительность движения в очаге τ и тензор сейсмического момента (ТСМ). По ТСМ были рассчитаны механизм очага, значения скалярного сейсмического момента M_0 и моментной магнитуды M_w .

Во втором случае при расчете механизма использовались записи 41 станции Камчатской сети и 38 удаленных станций в интервале эпицентральных расстояний до ~ 9000 км. При расчете механизма очага по знакам первым вступлений объемных волн глубина гипоцентра h принималось равной глубине эквивалентного точечного источника, полученной при расчете тензора сейсмического момента по региональным широкополосным сейсмограммам. Приняты следующие значения h : для основного толчка $h = 10$ км, для афтершока № 2 $h = 15$ км.

Для всех построенных механизмов ось растяжения сброшенных напряжений субвертикальна, а ось сжатия субгоризонтальна и ориентирована вдоль направления юго-восток — северо-запад. Это позволяет предположить, что приблизительно в том же направлении ориентирована и ось региональных сеймотектонических напряжений сжатия. Тип движения по обеим возможным плоскостям во всех случаях преимущественно взброс. Только в механизме афтершока № 2 присутствует заметная сдвиговая компонента (правосторонняя для плоскости, падающей на северо-запад).

МАКРОСЕЙСМИЧЕСКИЕ ПРОЯВЛЕНИЯ

В результате опроса населения собрано и систематизировано 87 сообщений респондентов о землетрясении. ЮОЗ ощущалось с интенсивностью сотрясений I от 2 до 6 баллов в 29 пунктах Камчатского края, удаленных от эпицентра на расстоянии $\Delta = 87$ –420 км. Сотрясения интенсивностью 6 баллов наблюдались в пос. Усть-Камчатск ($\Delta = 90$ км), 5 баллов — в пос. Крутоберегово ($\Delta = 87$ км), на мысе Африка

Таблица 3. Механизм очага Южно-Озерновского землетрясения 29.03.2017 г., $M_w = 6.6$, и двух его сильнейших афтершоков.

Агентство, использованные данные, моментная магнитуда M_w	Оси главных напряжений ¹						Нодальные плоскости ²						Диаграмма механизма ³
	T		N		P		$NP1$			$NP2$			
	pl	azm	pl	azm	pl	azm	stk	dip	$slip$	stk	dip	$slip$	
Южно-Озерновское землетрясение													
КФ ФИЦ ЕГС РАН, знаки первых вступлений объемных волн	81	49	9	229	0	319	58	46	102	221	46	78	
КФ ФИЦ ЕГС РАН, полные сейсмограммы, $M_w = 6.5$	79	172	9	37	9	306	24	37	74	224	55	101	
GCMT, объемные, мантийные и поверхностные волны, $M_w = 6.6$	79	180	9	30	5	299	19	41	76	217	51	102	
NEIC, объемные волны, $M_w = 6.4$	80	128	2	20	10	120	16	35	84	202	55	94	
NEIC, W-фаза, $M_w = 6.6$	84	282	1	26	6	116	25	51	88	208	39	92	
Афтершок №1, 29.03.2017 г. 05 час 27 мин 45.64 с													
КФ ФИЦ ЕГС РАН, полные сейсмограммы, $M_w = 5.0$	82	216	8	31	1	121	24	46	79	219	45	101	
Афтершок №2, 30.03.2017 г. 21 час 24 мин 50.99 с													
КФ ФИЦ ЕГС РАН, знаки первых вступлений объемных волн	81	229	9	49	0	139	41	46	78	238	46	102	
КФ ФИЦ ЕГС РАН, полные сейсмограммы, $M_w = 4.9$	66	204	24	36	4	304	10	46	55	222	49	114	
GCMT, объемные, мантийные и поверхностные волны, $M_w = 5.1$	72	200	18	26	2	296	8	46	65	222	49	114	

Примечание. ¹Оси главных напряжений: *T* — растяжения, *P* — сжатия, *N* — промежуточная. Ориентация оси задается двумя углами — углом погружения *pl* и азимутом *azm*.

²Ориентация нодальных плоскостей *NP1*, *NP2* задается двумя углами: азимутом простираения *stk* и углом падения *dip*. Угол подвижки *slip* — угол в плоскости очага между направлением простираения и вектором подвижки (отсчитывается против часовой стрелки от направления простираения). Значения всех углов приведены в градусах.

³В равноплощадной проекции нижней полусферы.

Таблица 4. Условия, при которых проводились расчеты ТСМ, и оценки параметров очага Южно-Озерновского землетрясения 29.03.2017 г. и двух его сильнейших афтершоков по региональным широкополосным сейсмограммам.

Сейсмическое событие	$T_1 \div T_2$, с	d , с	N_{sta}	h , км	τ , с	M_0 , Н·м	M_w
Южно-Озерновское землетрясение	50÷150	200	18	10	6	$6.05 \cdot 10^{18}$	6.5
Афтершок № 1	30÷75	120	10	10	0	$3.94 \cdot 10^{16}$	5.0
Афтершок № 2	30÷90	150	8	15	0	$2.72 \cdot 10^{16}$	4.9

Примечание. $T_1 \div T_2$, d , N_{sta} — диапазон периодов, временное окно и число широкополосных сейсмических станций, использовавшихся в расчетах; h — глубина эквивалентного точечного источника; τ — длительность движения в очаге; M_0 — значения скалярного сейсмического момента; M_w — моментная магнитуда.

($\Delta = 88$ км), пос. Ключи ($\Delta = 164$ км) и Козыревск ($\Delta = 230$ км) (рис. 4). Оперативные оценки балльности, полученные по инструментальным данным, в основном находятся в хорошем соответствии с результатами опроса населения.

По данным Центра цунами Камчатского Управления гидрометеослужбы на побережье Камчатского края волны цунами не наблюдались.

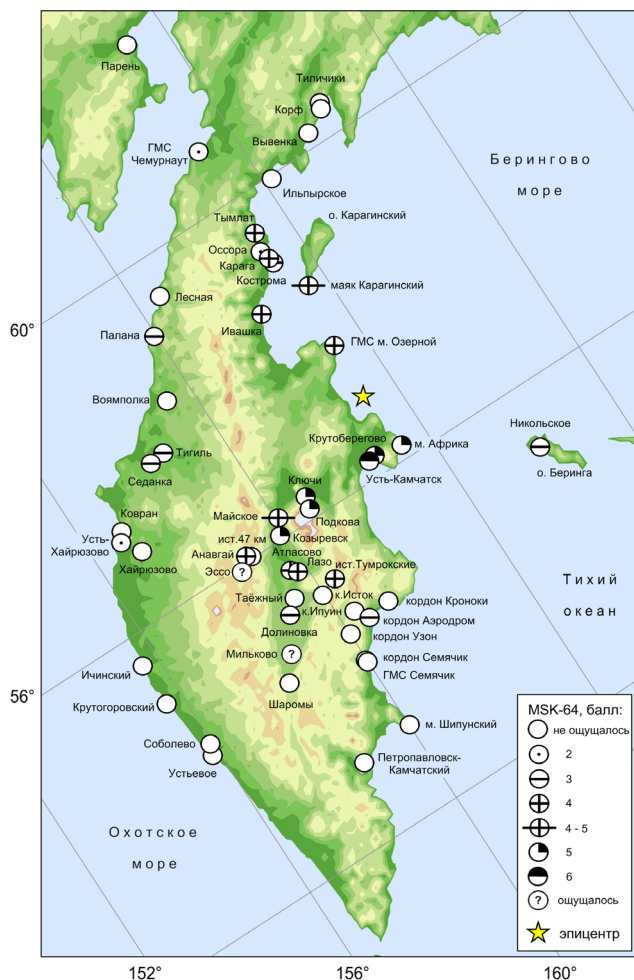


Рис. 4. Карта макросейсмического проявления Южно-Озерновского землетрясения 29.03.2017 г. $M_w = 6.6$ в пунктах сбора макросейсмической информации на территории Камчатского края по результатам опроса населения.

ПИКОВЫЕ АМПЛИТУДЫ КОЛЕБАНИЙ ГРУНТА

Создание на Камчатке сети акселерометров (Чебров и др., 2013в) позволяет изучать колебания грунта, вызванные сильным землетрясением, когда другие сейсмические приборы неработоспособны или зашкалены. Для обработки записей был применен программный пакет, кратко описанный в (Гусева и др., 1989). Его применение определяется тем фактом, что акселерографы CMG-5 в рабочей полосе частот ведут регистрацию ускорения без аппаратных

искажений и не требуют обратной фильтрации. Записи и спектры колебаний грунта на станции «Крутоберегово» приведены на рис. 5.

Исследован характер затухания пиковых амплитуд с гипоцентральной расстоянием r для станций, отмеченных красными треугольниками на рис. 1. Пиковые ускорения приведены на рис. 5а. Для сопоставления приводятся два варианта графиков затухания пиковых амплитуд горизонтального ускорения. Первый — для землетрясения с $M = 7$ согласно закону затухания, основанному на формуле из (Fukushima, Tanaka, 1990), для среднего грунта. Второй — для землетрясения 28.02.2013 г. с $M = 6.9$ на юге Камчатки. (Сильные ..., 2014), со сдвигом вниз на 0.2. Показано, что наблюдаемый ход затухания ускорений, вызванных ЮОЗ, сильнее, чем для события 2013 г. на Южной Камчатке. Этот результат согласуется с данными, полученными в (Чебров и др., 2014), которые указывают на вероятные различия законов затухания для разных сегментов Курило-Камчатского жёлоба.

Пиковые значения скорости грунта изображены на рис. 6б. Для сопоставления приводится график затухания с расстоянием наибольшего из значений пиковой скорости горизонтальных каналов, рассчитанной на основе калибровочной кривой для энергетического класса Федотова $K^{Ф68}$ (Федотов, 1972). Уровень кривой соответствует фактическому значению $K^{Ф68} = 15.0$. Наклон кривой равен -1.75 . Поведение этой калибровочной кривой близко к $V \sim r^{-1.75}$. Большая часть точек для горизонтальных каналов лежит выше прямой. Наибольшая положительная аномалия амплитуды достигает 10 раз для станции «Козыревск». Расхождение, по-видимому, имеет две причины. Первая — это эффект широкой полосы канала цифрового велосиграфа в сравнении с ограниченным по полосе сигналом на канале 1.2-секундного сейсмографа ВЭГИК, эмулируемого по цифровым записям для расчетов $K^{Ф68}$. Вторая вероятная причина в том, что большая часть станций имеет заметные станционные аномалии. Качественное согласие тренда наблюдаемых данных с трендом калибровочной кривой вполне приемлемое. Более детальный анализ амплитуд может быть проведен после выполнения аккуратной классификации станций по типам грунтов.

ПРЕДВЕСТНИКИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

Перед ЮОЗ наблюдались аномалии в параметрах геофизических полей и сейсмического режима. По данным Камчатского филиала Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений, оценке сейсмической опасности и риска (КФ РЭС) (Чебров и др., 2011) перед ЮОЗ

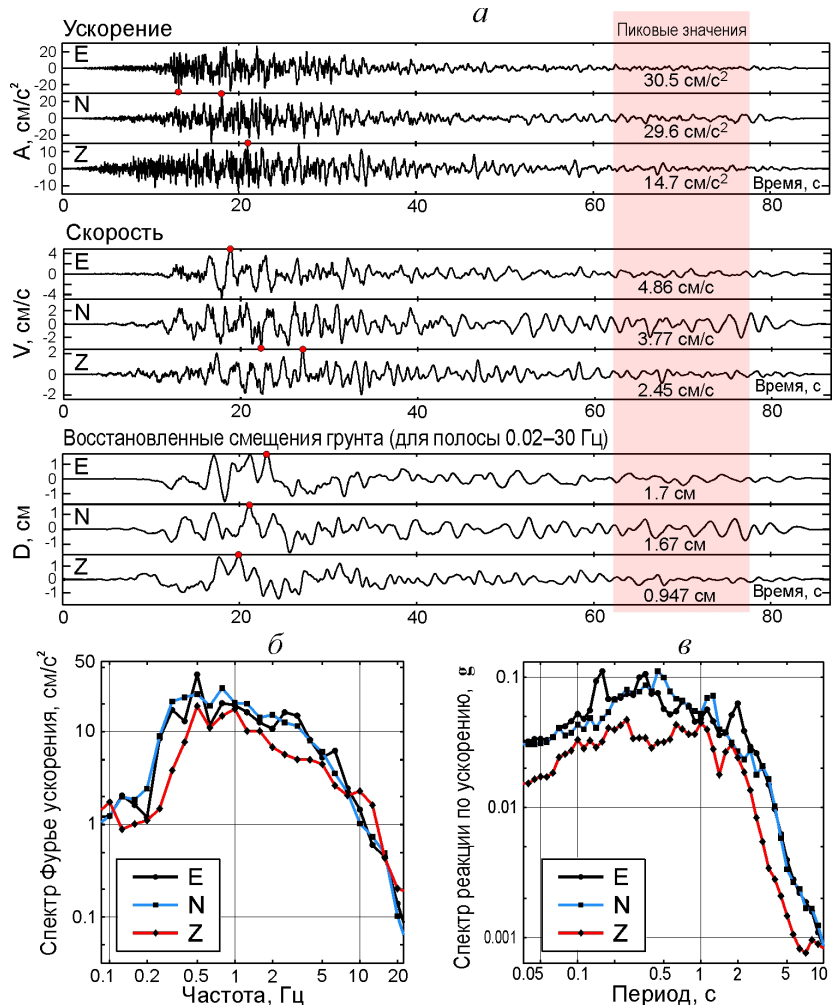


Рис. 5. Трехкомпонентные записи (ускорение, скорость, восстановленное смещение) Южно-Озерновского землетрясения 29.03.2017 г. $M_w = 6.6$ и спектры ускорения на ближайшей к очагу сейсмической станции «Крутоберегово» (KBG), $\Delta = 87$ км: *a* — сейсмические записи; *б* — спектры Фурье ускорения; *в* — спектры реакции по ускорению. Сейсмические каналы: восток-запад (Е), север-юг (N), вертикальный (Z). Пиковые значения для каждой записи выделены точкой.

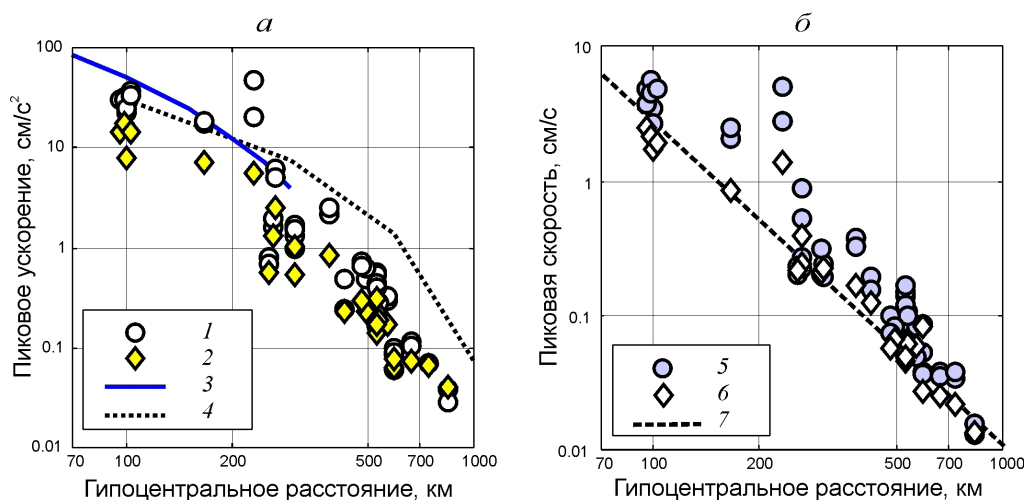


Рис. 6. Пиковые ускорения и скорости в функции расстояния при Южно-Озерновском землетрясении 29.03.2017 г. $M_w = 6.6$: *a* — зависимость ускорения от гипоцентрального расстояния $a(r)$ для горизонтальной (1) и для вертикальной (2) компоненты в сравнении с типовой зависимостью для Японских о-вов по (Fukushima, Tanaka, 1990) (3) и эмпирической средней зависимостью $a(r)$ для землетрясения на юге Камчатки 28.02.2013 г. $M_w = 6.8$ (4); *б* — зависимость скорости от гипоцентрального расстояния для горизонтальной (5) и вертикальной (6) компоненты и кривая затухания (7), полученная на основе калибровочной функции для $K^{Ф68}$ (Федотов, 1972). Комментарии в тексте.

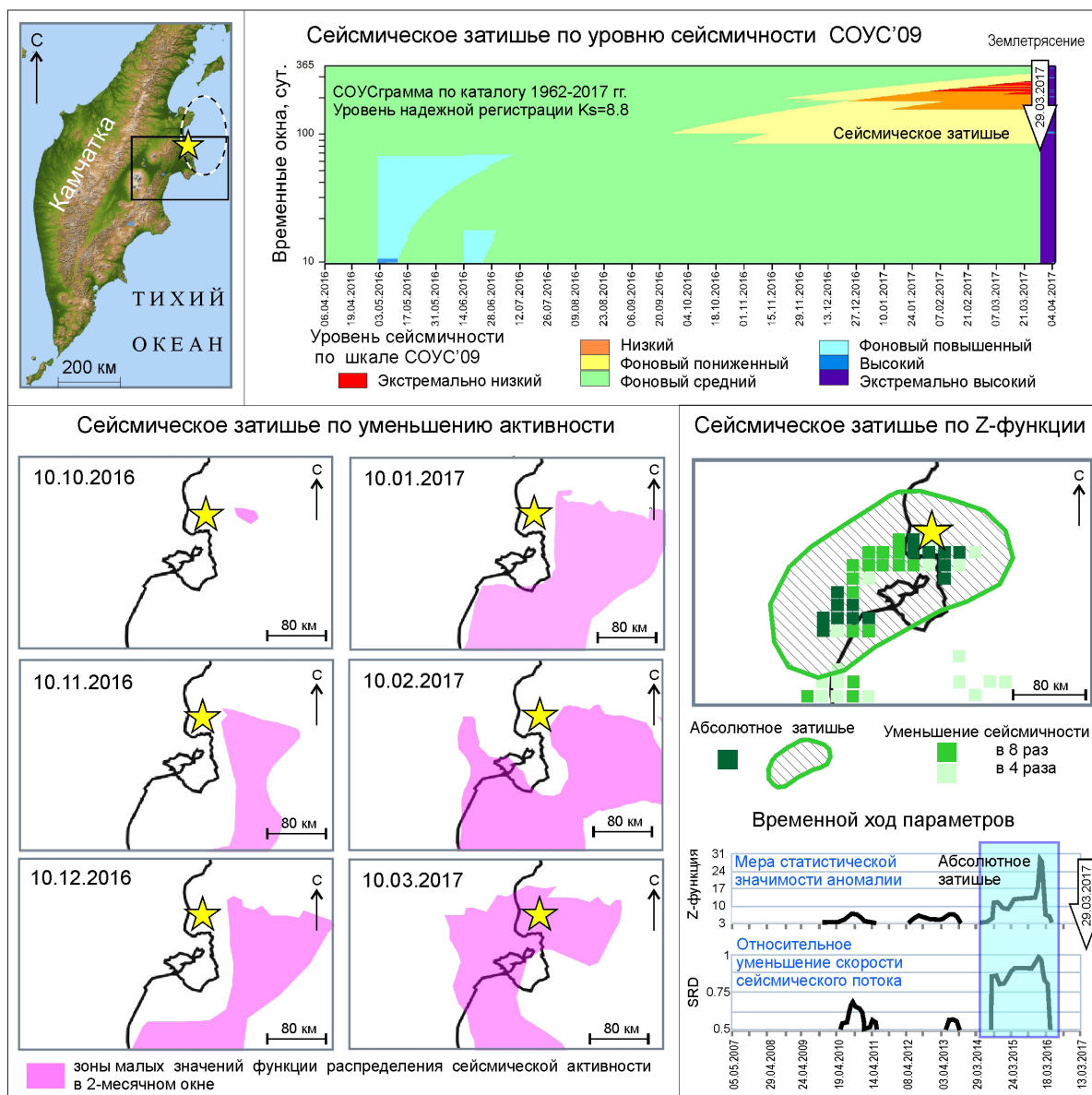


Рис. 7. Сейсмические затишья перед Южно-Озерновским землетрясением 29.03.2017 г. $M_w = 6.6$. Звездой обозначен эпицентр землетрясения. На карте Камчатки (вверху слева) эллипсом отмечена область, для которой был проведен анализ уровня сейсмичности по шкале СОУС'09; прямоугольник соответствует районам, представленным в нижней части рисунка. Обсуждение в тексте.

в режиме реального времени и ретроспективно были выявлены предвестники, а три прогноза были признаны успешными (табл. 5).

Особенностью подготовки ЮОЗ является длительное (более двух лет) сейсмическое затишье (рис. 7), выделяемое несколькими независимыми сейсмологическими методами (Гитис и др., 2015; Салтыков, 2011; Wyss, 1988).

Эпицентр землетрясения 29.03.2017 г. попадает в область абсолютного сейсмического затишья по параметру «Z-функция», которое наблюдалось с февраля 2015 г. по январь 2016 г. В этот промежуток времени на глубинах до 70 км не было зафиксировано ни одного землетрясения с энергетическим классом $K \geq 8.5$. На основании исследования этого затишья в ноябре 2016 г.

в КФ РЭС было передано прогностическое заключение о возможности сильного землетрясения с $M > 6.0$ в пределах сейсмической брешы. Прогноз признан успешным (табл. 5).

Тенденция в понижении уровня сейсмичности прослеживается с осени 2016 г. В течение 1–2 месяцев перед землетрясением сейсмическое затишье формируется в больших временных окнах ~ 230–240 суток, и уровень сейсмичности опускается на низкий — *экстремально низкий* уровень по шкале СОУС'09 (Салтыков, 2011).

Уменьшение параметра «сейсмическая активность» (Гитис и др., 2015) выявляется с октября 2016 г. Наиболее стабильная часть аномалии лежит к востоку от эпицентра. Затишье в этой зоне наблюдалось вплоть до землетрясения

Таблица 5. Предвестники и успешные прогнозы Южно-Озерновского землетрясения 29.03.2017 г. $M_w = 6.6$ по данным КФ РЭС.

№	Исполнитель, организация	Методика, ссылки	Заключение КФ РЭС
1	В.А. Гаврилов, ИВиС ДВО РАН	Мониторинг вариаций геоакустической эмиссии в глубокой скважине (Гаврилов и др., 2006)	<i>Успешный прогноз.</i> Заключение о сейсмической обстановке от 17.03.2017 г.
2	Н.Г. Томилин, ФТИ РАН	Мониторинг кинетических параметров сейсмичности (Томилин, Куксенко, 2004)	<i>Успешный прогноз.</i> Заключения о сейсмической обстановке от 19.10.2011 г. и 10.09.2013 г.
3	Н.М. Кравченко, КФ ФИЦ ЕГС РАН	Z-функция, (Кравченко, 2005; Салтыков, Кугаенко, 2000)	<i>Успешный прогноз.</i> Заключение о сейсмической обстановке от 18.11.2016 г.
4	Л.Б. Славина, ИФЗ РАН	Вариации отношения скоростей сейсмических волн V_p/V_s (параметр t)	<i>Предвестник, выявленный в режиме реального времени.</i> Заключение о сейсмической обстановке от 23.03.2017 г. Некорректная формулировка прогноза.
5	В.В. Богданов, ИКИР ДВО РАН	Мониторинг параметров ионосферы (Богданов и др., 2004)	<i>Предвестник, выявленный в режиме реального времени.</i> Заключение о сейсмической обстановке от 29.03.2017 г. Некорректная формулировка прогноза.
6	А.Ю. Шекотов, ИФЗ РАН	Геомагнитные наблюдения (Schekotov et al., 2006)	<i>Предвестник, выявленный в режиме реального времени.</i> Заключение о сейсмической обстановке от 05.01.2017 г. Ошибка по положению гипоцентра.
7	С.Э. Смирнов, ИКИР ДВО РАН	Мониторинг вариаций геомагнитного и атмосферного электрического поля Земли (Богданов и др., 2004)	<i>Предвестник, выявленный в режиме реального времени.</i> Заключение о сейсмической обстановке от 23.03.2017 г. Ошибка по положению гипоцентра

Примечание. ИВиС ДВО РАН — Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, г. Петропавловск-Камчатский; ФТИ РАН — Физико-технический институт РАН, г. Санкт-Петербург; КФ ФИЦ ЕГС РАН — Камчатский филиал Федерального исследовательского центра «Единая Геофизическая служба РАН», г. Петропавловск-Камчатский; Камчатский; ИКИР ДВО РАН — Институт космофизических исследований и распространения радиоволн ДВО РАН, с. Паратунка, Камчатский край; ИФЗ РАН — Институт физики Земли РАН, г. Москва.

(до 28.03.2017 г.). Сразу после землетрясения (30.03.2017 г.) стала наблюдаться активизация.

Таким образом, параметрические аномалии сейсмического режима перед сильным ЮОЗ имели длительность от двух лет до одного-двух месяцев.

ТЕКТОНИЧЕСКАЯ ДИСКУССИЯ

ЮОЗ произошло в области конвергентного сочленения трех крупнейших литосферных плит: Тихоокеанской, Северо-Американской и Евразийской. По-видимому, их взаимодействие привело к дроблению региона на серию малых плит и блоков, во многом наследующих кинематику крупнейших образований (рис. 8). Если границы быстро перемещающейся Тихоокеанской плиты четко структурно выражены зонами субдукции и трансформными разломами, то мозаика малых плит определена не столь однозначно. Их границы в основном проявлены поясами рассеян-

ной сейсмичности различной ширины и редко могут быть привязаны к конкретным разломам. Именно в такой сложной области произошло исследуемое землетрясение.

При более детальном взгляде эпицентр основного толчка ЮОЗ располагается в районе сочленения активной северной границы Алеутской дуги и Корякского сейсмического пояса, разделяющего Охотскую плиту и Берингию (Ландер и др., 1994) (рис. 8, врезка). Западная часть Алеутской дуги, находясь под тангенциальным воздействием Тихоокеанской плиты, разбита на несколько блоков, перемещающихся параллельно последней в северо-западном направлении, то есть вдоль дуги (Левин и др., 2012; Cross, Freymueller, 2008). При этом сильные мелкофокусные землетрясения с магнитудами $M \geq 5-7$ происходят как на северной, так на южной границах блоков дуги. Наиболее западный сегмент дуги, Командорский блок, сближается с Камчаткой со скоростью 4–5 см/год и сталки-



Рис. 8. Мозаика литосферных плит вдоль северной окраины Тихого океана. Направления движения плит пересчитаны относительно Северо-Американской плиты на основе модели NNR-MORVEL56 (Argus et al., 2011): 1 — границы плит (штрих-пунктир — дискуссионные) и внутриконтинентальные сейсмические пояса; 2 — области рассеянной сейсмичности; 3 — внесмасштабные векторы локальных направлений движения плит. На врезке подробнее представлен район, в котором произошло Южно-Озерновское землетрясение 29.03.2017 г. Скорость Командорского блока и Тихоокеанской плиты приведена по (Левин и др., 2012). Направление движения Берингии указано предположительно.

вается с ней в районе небольшого Камчатского полуострова (Селиверстов, 2009; Gaedicke et al., 2000; Geist, Scholl, 1994). Эта область торцевой коллизии принципиально отличается от расположенной южнее Камчатской зоны субдукции (Кожурин и др., 2014). Здесь наблюдаются только мелкофокусные землетрясения. Наибольшая коллизийная активность характерна для акваторий, прилегающих к восточному побережью Камчатского полуострова, и выражена землетрясениями с магнитудами до 7. В то же время область более слабой рассеянной сейсмичности охватывает весь полуостров (Левина и др., 2013). Однако, учитывая структурные наблюдения (Кожурин, Пинегина, 2013), и здесь нельзя отрицать возможность возникновения сильных событий. Предполагается, что современные деформации, связанные с коллизией Командорского блока, могут распространяться на весь Камчатский полуостров (Кожурин, Пинегина, 2013; Кожурин и др., 2014) и, в частности, на прилегающую с севера область, где 29.03.2017 г. произошло ЮОЗ.

На север от области сочленения Камчатки и Алеутской дуги располагается Корякский сейсмический пояс (рис. 9). Он протянулся на север (и далее на северо-восток) вдоль вос-

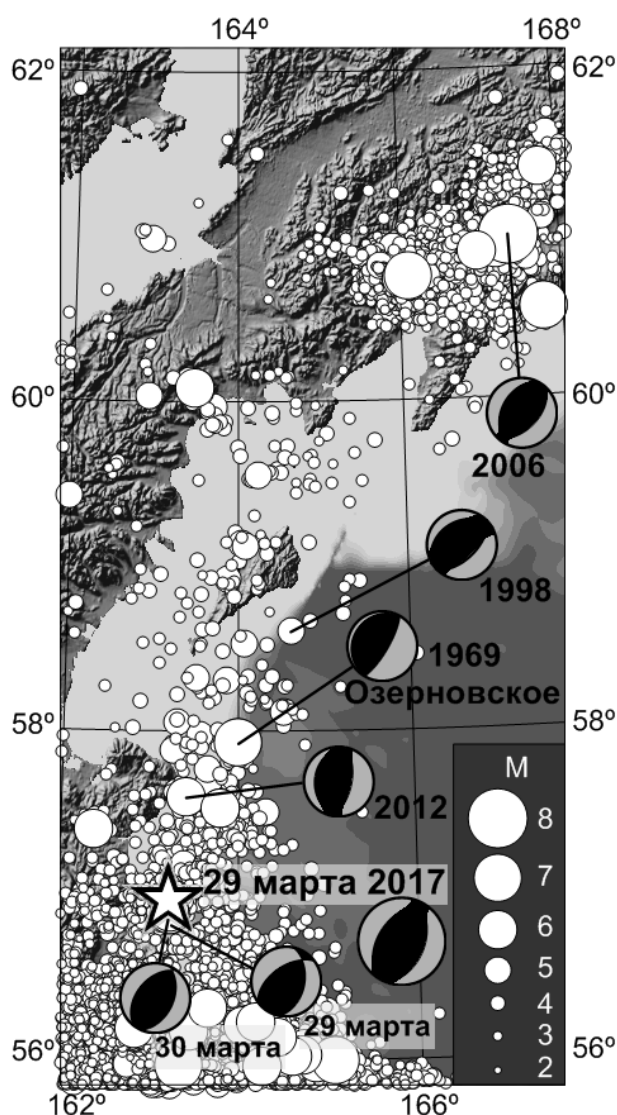


Рис. 9. Сейсмичность юго-западной части Корякского сейсмического пояса и области сочленения Камчатки с Алеутской дугой за 1962–2017 гг. (по данным Камчатского регионального каталога). Звездой отмечен эпицентр Южно-Озерновского землетрясения 29.03.2017 г. Механизмы сильнейших землетрясений в равноплощадной проекции нижней полушеры приведены согласно GСMT. и результатам настоящего исследования. Для механизма Озерновского землетрясения 1969 г. выбрана оценка, представленная в работе (Martin et al., 2008).

точно-камчатского шельфа, Корякского нагорья и через Восточную Чукотку на Аляску (Ландер и др., 1994; Левина и др., 2013). Хотя Корякский сейсмический пояс продолжает по простиранию Камчатскую зону субдукции, он, как и сейсмичность Камчатского полуострова, имеет иную тектоническую природу. Это полоса преимущественно рассеянной сейсмичности, в пределах которой происходят только мелкофокусные землетрясения, отражающие коллизийную и трансформную обстановку взаимодействия малой плиты Берингии с Охотской и Северо-

американской плитой (Гордеев и др., 2015; Левина и др., 2013; Maskey et al., 1997) (рис. 8). В пределах юго-западной части пояса зафиксированы достаточно сильные землетрясения с магнитудами достигающими 7.7. В частности сильнейшее землетрясение южной части Корякского пояса (Озерновское) произошло 22.11.1969 г. и имело магнитуду в пределах 7.3–7.7, а облако его афтершоков (рис. 1а) протянулось вдоль пояса более чем на 100 км (Федотов и др., 1973). Коллизионный характер тектонических движений в этой части границы плит подтверждается механизмами землетрясений, большинство из которых имеют взбросовый характер с субширотным или северо-западным направлением оси сжатия (рис. 9). Скорость сближения Берингии с расположенными западнее плитами не определена, но, по-видимому, она не превышает 1–2 см/год. ЮОЗ произошло у южного окончания Корякского сейсмического пояса.

Таким образом, по своему географическому положению ЮОЗ может быть отнесено к каждой из двух тектонических зон: области сочленения Камчатки с Алеутской дугой или Корякскому сейсмическому поясу. Заметим, что, несмотря на различие геодинамических причин, породивших эти зоны, и скоростей относительного движения плит, с точки зрения происходящих в них деформационных процессов обе зоны имеют определенное сходство. В обоих случаях это области коллизии с субширотным или северо-западным направлением главной оси сжатия.

Обратим внимание, что в представленных параметрах обсуждаемого землетрясения можно обнаружить как черты процессов, характерных для Корякского сейсмического пояса, то есть порожденных столкновением Берингии с Охотской плитой, так и элементы, которые поддаются интерпретации как результат Камчатско-Алеутской коллизии.

В пользу принадлежности ЮОЗ Корякскому сейсмическому поясу говорит не только географическое положение, но и хорошее соответствие механизмов главного толчка и афтершоков всем остальным ранее известным оценкам для землетрясений южной части пояса (рис. 9). Этот факт можно интерпретировать как принадлежность всех событий единому полю сеймотектонических напряжений. Наиболее ярко эти наблюдения проявляются при сопоставлении ЮОЗ с сильнейшим землетрясением района — Озерновским 1969 г. Нами продемонстрировано (рис. 1а), что очаг ЮОЗ практически полностью лежит в пределах облака афтершоков более сильного события 1969 г. С другой стороны, построенные оценки тензоров сейсмического момента для ЮОЗ и двух его сильнейших афтершоков демонстрируют, что простирания нодальных плоско-

стей и азимуты главных осей сжатия для этих событий близки (в пределах 10° – 20°) к соответствующим параметрам механизма Озерновского землетрясения 1969 г. (Martin et al., 2008). Кроме того указанные простирания плоскостей соответствуют и направлению, в котором вытянуто облако афтершоков 1969 г. (рис. 1а). Такие совпадения указывает на единство тектонических процессов, обусловивших эти землетрясения, и делают правомерным вопрос: не является ли Южно-Озерновское землетрясение отдаленным афтершоком Озерновского 1969 г.

В то же время следует обратить внимание, что ЮОЗ произошло на северо-западном склоне подводного каньона Покатый (рис. 10). Согласно (Кожурин, Пинегина, 2013) вдоль северного борта континентального продолжения каньона проходит разлом Покатый, на котором документированы новейшие (3–5 тыс. лет) разовые подвижки, соответствующие землетрясениям с магнитудами до ~ 7.7 . Судя по расположению относительно каньона, очаг ЮОЗ вполне вероятно находится на подводном продолжении этого разлома, а простирание одной из возможных плоскостей разрыва в очаге ЮОЗ (и двух сильнейших афтершоков) близко к направлению северного борта каньона (рис. 10). Также согласно (Кожурин, Пинегина, 2013) описанные каньон и разлом являются северным ограничением области деформаций, порожденных Алеутской коллизией. Это позволяет предположить ана-

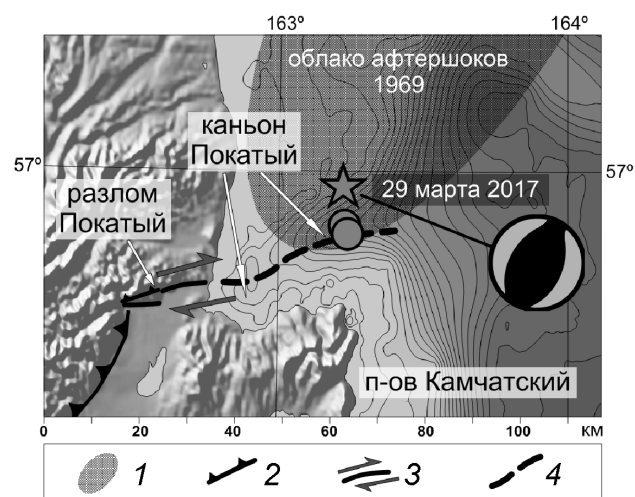


Рис. 10. Расположение и механизм Южно-Озерновского землетрясения 29.03.2017 г. (звезда) и двух его сильнейших афтершоков (кружки) относительно очага Озерновского землетрясения 1969 г. и разломов северо-западного обрамления области коллизии Камчатки и Алеутской дуги: 1 — область афтершоков двух первых дней Озерновского землетрясения 1969 г.; 2 — взбросы; 3 — правосторонний сдвиг; 4 — предполагаемое продолжение разлома вдоль каньона Покатый. Разломы приведены согласно (Кожурин и др., 2014). Механизмы показаны в равноплощадной проекции нижней полусферы.

логичное происхождение и для обсуждаемого землетрясения. Тем не менее, здесь мы сталкиваемся с определенным противоречием наблюдениям. В работе (Кожурин, Пинегина, 2013) отмечено преобладание на описанном разломе правосторонней сдвиговой компоненты. Но все найденные механизмы очагов ЮОЗ и его афтершоков являются взбросами. Заметная сдвиговая компонента зафиксирована лишь у афтершока № 2, но и в этом случае она заметно уступает взбросовой составляющей.

Учитывая последнее замечание, в настоящее время мы отдаем предпочтение первой гипотезе о связи ЮОЗ с движениями на охотско-берингской границе.

Тем не менее, проблему нельзя считать окончательно решенной. Поле напряжений вблизи области сочленения границ нескольких плит может оказаться значительно сложнее простых предположений. Уточнения могут внести полевые работы в прибрежных районах вблизи эпицентральной зоны ЮОЗ.

Возвращаясь к полученным оценкам тензоров сейсмического момента ЮОЗ и его сильнейших афтершоков, обратим внимание на выбор для них активных плоскостей разрыва. Обе рассмотренные здесь тектонические гипотезы опираются на данные, предполагающие падения активных разломов: Покатого (Кожурин, Пинегина, 2013) и в очаге Озерновского землетрясения 1969 г. (Martin et al., 2008) — под континент (приблизительно на северо-запад). Поэтому при выборе активной плоскости разрыва во всех представленных случаях мы отдаем предпочтение плоскости *NP2* (табл. 4).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

29.03.2017 г. у восточного побережья Камчатки в юго-западной части Корякского сейсмического пояса произошло редкое для этой зоны сильное, но не вызвавшее разрушений и цунами, землетрясение с магнитудой $M_w = 6.6$.

Гипоцентр находился под акваторией залива Озерного, в южной его части, поэтому это сейсмическое событие было названо Южно-Озерновским землетрясением в соответствии с географическим положением.

Землетрясение ощущалось на территории Камчатского края с интенсивностью до 6 баллов по шкале MSK-64.

В РИОЦ «Петропавловск» параметры Южно-Озерновского землетрясения были определены в режиме ССД и СПЦ в течение ~ 6–7 мин. в соответствии с регламентами этих служб. Параметры землетрясения соответствовали потенциально цунамигенному землетрясению, поэтому была объявлена тревога цунами.

В оперативном режиме были проведены обработка и анализ афтершоков, рассчитан механизм очага и собрана детальная макросейсмическая информация о проявлениях землетрясения.

Выполнен предварительный анализ пиковых амплитуд колебаний грунта. Для пиковых ускорений затухание амплитуды с расстоянием сопоставимо с таковым для типичных землетрясений Японии (в диапазоне расстояний 100–200 км). На больших расстояниях затухание увеличивается; при этом рост затухания является более резким, чем при землетрясениях Южной Камчатки. Для пиковых скоростей в диапазоне расстояний 100–700 км затухание согласуется с калибровочной кривой шкалы энергетического класса Федотова $K^{Ф68}$.

По данным КФ РЭС перед Южно-Озерновским землетрясением были выявлены предвестники в режиме реального времени, а три прогноза были признаны успешными. Подготовка землетрясения сопровождалась сейсмическим затишьем, которое проявилось в независимых параметрах сейсмичности на различных временных интервалах: от двух лет до нескольких месяцев перед землетрясением.

Анализ данных о геодинамической обстановке и тектонике территории, на которой произошло Южно-Озерновское землетрясение, а также механизмы очагов основного толчка и сильнейших афтершоков позволяют предположить, что это сейсмическое событие является результатом подвижки на границе малых литосферных плит: Охотской и Берингии.

Список литературы

- Абубакиров И.Р., Павлов В.М., Титков Н.Н. Механизм глубокого Охотоморского землетрясения 24.05.2013 г. по статическим смещениям и широкополосным сейсмограммам // Вулканология и сейсмология. 2015. № 4. С. 23–39.
- Богданов В.В., Бузевич А.В., Винницкий А.В. и др. О влиянии солнечной активности на атмосферные и сейсмические процессы Камчатки // Комплексные сейсмологические и геофизические исследования Камчатки. Петропавловск-Камчатский: Камчатский печатный двор, 2004. С. 259–278.
- Гаврилов В.А., Власов Ю.А., Денисенко В.П. и др. Опыт комплексных скважинных геофизических наблюдений в целях мониторинга состояния геосреды // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2006. № 2. Вып. 8. С. 44–53.
- Гитис В.Г., Дерендяев А.Б., Салтыков В.А. ГИС-платформа мониторинга и анализа полей сейсмической активности // Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России. Труды Пятой

- научно-технической конференции. Петропавловск-Камчатский, 27 сентября – 3 октября 2015 г. Обнинск: ГС РАН, 2015. С. 47–50.
- Гордеев Е.И., Пинегина Т.К., Ландер А.В., Кожурин А.И. Берингия: сейсмическая опасность и фундаментальные вопросы геотектоники // Физика Земли. 2015. № 4. С. 58–67.
- Гусева Е.М., Гусев А.А., Оскорбин Л.С. Пакет программ для цифровой обработки сейсмических записей и его опробование на примере некоторых записей сильных движений // Вулканология и сейсмология. 1989. № 5. С. 35–49.
- Дрознин Д.В., Чебров Д.В., Дрознина С.Я., Ото-тук Д.А. Автоматизированная оценка интенсивности сейсмических сотрясений по инструментальным данным в режиме квазиреального времени и ее использование в рамках службы срочных сейсмических донесений на Камчатке // Сейсмические приборы. 2017. № 3. С. 5–19.
- Кожурин А.И., Пинегина Т.К. Активные разломные деформации полуострова Камчатский // Материалы Четвертой научно-технической конференции «Проблемы комплексного геофизического мониторинга Дальнего Востока России». 29 сентября – 5 октября 2013 г., Петропавловск-Камчатский. Обнинск: ГС РАН, 2013. С. 163–166.
- Кожурин А.И., Пинегина Т.К., Пономарева В.В. и др. Скорость коллизионных деформаций Камчатского полуострова (Камчатка) // Геотектоника. 2014. № 2. С. 42–60.
- Кравченко Н.М. Оценка достоверности сейсмического затишья, выделенного с помощью Z-теста, как предвестника сильного землетрясения // Вулканология и сейсмология. 2005. № 1. С. 59–66.
- Ландер А.В., Букчин Б.Г., Дрознин Д.В., Кирюшин А.В. Тектоническая позиция и очаговые параметры Хаилинского (Корякского) землетрясения 8 марта 1991 г.: существует ли плита Берингия? // Вычислительная сейсмология. Вып. 26. М.: Наука, 1994. С. 103–122.
- Левин В.Е., Бахтияров В.Ф., Титков Н.Н. и др. Исследования современных движений земной коры (СДЗК) на Камчатке // Комплексные сейсмологические и геофизические исследования на Камчатке» (К 50-летию детальных сейсмологических наблюдений). Петропавловск-Камчатский: Новая книга, 2012. С. 188–210.
- Левина В.И., Ландер А.В., Митюшкина С.В., Чеброва А.Ю. Сейсмичность Камчатского региона 1962–2011 гг. // Вулканология и сейсмология. 2013. № 1. С. 41–64.
- Медведев С.В., Шпонхойер В., Карник В. Шкала сейсмической интенсивности MSK-64. М.: МГК АН СССР, 1965. 11 с.
- Павлов В.М., Абубакиров И.Р. Алгоритм расчета тензора сейсмического момента сильных землетрясений по региональным широкополосным сейсмограммам объемных волн // Вестник КРАУНЦ. Науки о Земле. 2012. № 2. Вып. 20. С. 149–158.
- Салтыков В.А. Статистическая оценка уровня сейсмичности: методика и результаты применения на примере Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2011. № 2. С. 53–59.
- Салтыков В.А., Кравченко Н.М., Кугаенко Ю.А., Коновалова А.А. Параметрическое представление динамики сейсмичности Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2013. № 1. С. 65–84.
- Салтыков В.А., Кугаенко Ю.А. Сейсмические затишья перед двумя сильными землетрясениями 1996 г. на Камчатке // Вулканология и сейсмология. 2000. № 1. С. 57–65.
- Селиверстов Н.И. Геодинамика зоны сочленения Курило-Камчатской и Алеутской островных дуг. Петропавловск-Камчатский: КамГУ, 2009. 191 с.
- Сильные камчатские землетрясения 2013 года / Под ред. В.Н. Чеброва. Петропавловск-Камчатский: Новая книга, 2014. 252 с.
- Славина Л.Б., Мячкин В.В. Кинематические предвестники сильных сейсмических событий (методика и результаты прогноза землетрясений на примере Камчатки) // Геофизические исследования. 2005. № 3. С. 24–37.
- Томилин Н.Г., Куксенко В.С. Статистическая кинетика разрушения горных пород: энергетическая иерархия процессов // Физика Земли. 2004. № 10. С. 16–25.
- Федотов С.А. Энергетическая классификация Курило-Камчатских землетрясений и проблема магнитуд. М.: Наука, 1972. 117 с.
- Федотов С.А., Гусев А.А., Зобин В.М. и др. Озерновское землетрясение и цунами 22 (23) ноября 1969 г. // Землетрясения в СССР в 1969 г. М.: Наука, 1973. С. 195–208.
- Чебров В.Н., Кугаенко Ю.А., Абубакиров И.Р. и др. Жупановское землетрясение 30.01.2016 г. с $K_s = 15.7$, $M_w = 7.2$, $I = 6$ (Камчатка) // Вестник КРАУНЦ. 2016. № 1. Вып. 29. С. 5–16.
- Чебров В.Н., Кугаенко Ю.А., Викулина С.А. и др. Землетрясение 28.02.2013 г. $M_w = 6.8$ по данным оперативной обработки // Вестник КРАУНЦ. 2013а. № 1. Вып. 21. С. 9–16.
- Чебров В.Н., Кугаенко Ю.А., Викулина С.А. и др. Глубокое Охотоморское землетрясение 24.05.2013 г. с магнитудой $M_w = 8.3$ — сильнейшее сейсмическое событие у берегов Камчатки за период детальных сейсмологических наблюдений // Вестник КРАУНЦ. 2013б. № 1. Вып. 21. С. 17–24.

- Чебров В.Н., Дроздин Д.В., Кугаенко Ю.А. и др.* Система детальных сейсмологических наблюдений на Камчатке в 2011 г. // Вулканология и сейсмология. 2013в. № 1. С. 18–40.
- Чебров В.Н., Салтыков В.А., Серафимова Ю.К.* Прогнозирование землетрясений на Камчатке. По материалам работы Камчатского филиала Российского экспертного совета по прогнозу землетрясений, оценке сейсмической опасности и риска в 1998–2009 гг. М.: Светоч Плюс, 2011. 304 с.
- Чебров Д.В., Гусев А.А., Чебров В.Н.* Моделирование карты изосейст сильного землетрясения на Камчатке с учетом анизотропии затухания // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Материалы Девятой международной сейсмологической школы. Республика Армения, 8–12 сентября 2014 г. Обнинск: ГС РАН, 2014. С. 340–344.
- Argus D.F., Gordon R.G., DeMets C.* Geologically current motion of 56 plates relative to the no-net-rotation reference frame // *Geochem. Geophys. Geosyst.* 2011. V. 12. № 11. P. 1–13.
- Bath M.* Lateral inhomogeneities of the upper mantle // *Tectonophysics.* 1965. V. 2. № 6. P. 483–514.
- Cross R.S., Freymueller J.T.* Evidence for and implications of a Bering plate based on geodetic measurements from the Aleutians and western Alaska // *JGR.* 2008. V. 113. B07405. Doi:10.1029/2007JB005136.
- Fukushima Y., Tanaka T.* A New Attenuation Relation for Peak Horizontal Acceleration of Strong Earthquake Ground Motion in Japan // *Bulletin of the Seismological Society of America.* 1990. V. 80. № 4. P. 757–783.
- Gaedicke C., Baranov B., Seliverstov N. et al.* Structure of an active arc — continent collision area: the Aleutian-Kamchatka junction // *Tectonophysics.* 2000. V. 325. № 1–2. P. 63–85.
- Geist E.L., Scholl D.W.* Largescale deformation related to the collision of the Aleutian Arc with Kamchatka // *Tectonics.* 1994. V. 13. № 2. P. 538–560.
- Mackey K.G., Fujita K., Gunbina L.V. et al.* Seismicity of the Bering Strait region: evidence for a Bering block // *Geology.* 1997. V. 25. № 11. P. 979–982.
- Martin M.E., Weiss R., Bourgeois J. et al.* Combining constraints from tsunami modeling and sedimentology to untangle the 1969 Ozernoi and 1971 Kamchatskii tsunamis // *Geophysical Research Letters.* 2008. V. 35. L01610. doi:10.1029/2007GL032349.
- Schekotov A., Molchanov O., Hattori K. et al.* Seismo-ionospheric depression of the ULF geomagnetic fluctuations at Kamchatka and Japan // *Physics and Chemistry of the Earth.* 2006. V. 31. Is. 4–9. P. 313–318.
- Wyss M., Habermann R.E.* Precursory seismic quiescence // *Pure and Applied Geophysics.* 1988. V. 126. № 2/4. P. 319–332.
- Д.В. Чебров¹, Ю.А. Кугаенко¹, А.В. Ландер², И.Р. Абубакиров¹, П.В. Воропаев¹, А.А. Гусев^{1,3}, Д.В. Дроздин¹, С.Я. Дроздина¹, Е.И. Иванова¹, Н.М. Кравченко¹, Е.А. Матвеев¹, С.В. Митюшкина¹, Д.А. Ототюк¹, В.М. Павлов¹, А.А. Раевская¹, В.А. Салтыков¹, С.Л. Сенюков¹, А.А. Скоркина^{1,4}, Ю.К. Серафимова¹.*
- ¹ Камчатский филиал
Федерального исследовательского центра
«Единая геофизическая служба
Российской академии наук»;
- ² Институт теории прогноза землетрясений
и математической геофизики
Российской академии наук;
- ³ Институт вулканологии
и сейсмологии ДВО РАН;
- ⁴ Институт физики Земли
им. О.Ю. Шмидта РАН.